УДК 532.321.9, 535.323 doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-465-469

ВЛИЯНИЕ ФОТОАКТИНИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОКРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ АМИНОПИРИДИНОВОГО РЯДА

К.Е. Жевайкин, М.И. Фокина, А.С. Широкова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: kiraje92@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию 18.04.20, принята к печати 15.05.20
Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Жевайкин К.Е., Фокина М.И., Широкова А.С. Влияние фотоактиничного излучения на показатель преломления органических сокристаллов на основе соединений аминопиридинового ряда // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 3. С. 465–469. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-465-469

Аннотация

Предмет исследования. Исследовано влияние фотоактиничного излучения на показатель преломления органических нелинейно-оптических сокристаллов 2,6-диаминопиридин-4-нитрофенол и 4-аминопиридин-4-нитрофенол. **Метод.** Методика проведенных исследований состояла в продолжительном засвечивании органических нелинейно-оптических сокристаллов аминопиридин-нитрофенол с помощью светодиода на длине волны 405 нм. В процессе засвечивания исследуемых сокристаллов проводилось последовательное измерение показателей преломления на инструментальном микроскопе Olympus STM6. **Основные результаты.** В ходе проведения длительного фотовоздействия наблюдается увеличение значения показателя преломления для обоих исследуемых сокристаллов. Представлены круговые диаграммы значений показателя преломления исследуемых органических сокристаллов аминопиридин-нитрофенол. **Практическая значимость.** Полученные результаты показывают возможность создания структур на базе органических сокристаллов аминопиридин-нитрофенол с заданным распределением показателя преломления (периодические решетки, фотонно-кристаллические структуры и т. д.).

Ключевые слова
органические сокристаллы, производные аминопиридина, показатели преломления, нелинейно-оптические материалы, фотообесцвечивание

Благодарности
Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00643/18.

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-465-469

PHOTOACTINIC IRRADIATION EFFECT ON REFRACTION INDICE OF ORGANIC CO-CRYSTALS BASED ON AMINOPYRIDINE SERIES

K.E. Zhevaikin, M.I. Fokina, A.S. Shirokova

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Corresponding author: kiraje92@yandex.ru

Article info
Received 18.04.20, accepted 15.05.20
Article in Russian

For citation: Zhevaikin K.E., Fokina M.I., Shirokova A.S. Photoactinic irradiation effect on refraction indice of organic co-crystals based on aminopyridine series. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 465–469 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-465-469

Abstract

Subject of Research. The paper presents research of photoactinic radiation effect on refractive indice of organic nonlinear optical co-crystals: 2.6-diaminopyridine-4-nitrophenol and 4-aminopyridine-4-nitrophenol. **Method.** The research technique included prolonged exposure of the organic nonlinear optical co-crystals of aminopyridine-nitrophenol to a light-emitting diode at a wavelength of 405 nm. In the exposure process of the studied co-crystals a sequential measurement of the refractive indices was carried out by Olympus STM6 instrumental microscope. **Main Results.** The increase in values of the refractive indices is observed for both co-crystals examined during the long photobleaching.

We present circle diagrams for refractive indices of the organic aminopyridine-nitrophenol co-crystals under study. **Practical Relevance.** The results obtained show the possibility of creating structures based on organic co-crystals of aminopyridine-nitrophenol with a given distribution of refractive indices (periodic lattice and photonic crystal structure).

Keywords
organic co-crystals, aminopyridine derivatives, refractometric indices, nonlinear optical materials, photobleaching

Acknowledgements
The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 18-32-00643/18.

Существует широкий спектр перспективных органических и полимерных нелинейно-оптических материалов, обладающих высокой поляризуемостью молекул, что обеспечивает их высокими значениями нелинейных восприимчивостей [1, 2]. Среди них можно выделить особенно многообещающие в сфере оптической телекоммуникации: кристалл MNA (2-метил-4-нитроанилин) [3]; кристалл POM (3-метил-4-нитропиридин-1-оксид) [4]; кристаллы NPP (N-(4-нитрофенил)-(L)-пролинол) и PNP (2-(N-(L)-пролинол)-5-нитропиридин) [5]; кристалл DAST (4-диметиламино-N-метил-4-стилбазол-тозилат) [6]. Одним из перспективных направлений создания элементов на базе подобных кристаллов является метод фотообесцвечивания [7–9]. Метод фотообесцвечивания позволяет создавать структуры с контролируемым локальным изменением оптических свойств без разрушения общей целостности материала (одномодовые и многомодовые оптические волноводы, фотонные кристаллы и т. д.) [10–12].

Потенциально интересными являются органические нелинейно-оптические сокристаллы на базе соединений аминопиридинового ряда, ранние исследования которых показали наличие достаточно высоких нелинейно-оптических коэффициентов при отсутствии деградации под воздействием мощного лазерного излучения, что делает их актуальными для применения в лазерной технике в качестве генераторов второй гармоники [13, 14]. Также данные материалы обладают высокими значениями энергии импульсов в терагерцовой области излучения, что обеспечивает их потенциальное применение в качестве генераторов терагерцового излучения [15, 16].

Настоящее исследование является продолжением цикла работ [17, 18] по исследованию влияния фотоактиничного излучения (фотообесцвечивание) на органические нелинейно-оптические сокристаллы на базе оптической хромофоры 4-нитрофенол (sigma aldrich cas-No.100-02-7) и производных аминопиридина: 2,6-диаминопиридин (sigma aldrich cas-No.141-86-6); 4-аминопиридин (sigma aldrich cas-No.504-24-5). Исследуемые сокристаллы (2,6-диаминопиридин-4-нитрофенол (26DAP4N) и 4-аминопиридин-4-нитрофенол (4AP4N)) были синтезированы и выращены методом кристаллизации из раствора при медленном испарении растворителя [14]. Целью данной работы является исследование влияния фотоактиничного излучения на значения показателя преломления органических нелинейно-оптических сокристаллов аминопиридин-нитрофенол.

Как показали исследования [17, 18], воздействие фотоактиничного излучения на исследуемые сокристаллы приводит к снижению оптического пропускания и деградации нелинейно-оптических свойств, в частности к уменьшению эффективности преобразования второй гармоники, вследствие разрушения водородных связей молекулярного комплекса аминопиридин-нитрофенол. Наиболее активно на данные сокристаллы воздействует излучение ультрафиолетовой и синей областей спектра, поэтому фотообесцвечивание сокристаллов проводилось при следующих параметрах: длина волны излучения 405 нм; мощность излучения 1 Вт; сила света 150 мКд. Фотообесцвечивание осуществлялось в течение четырех недель с промежуточными измерениями изменений показателей преломления исследуемых сокристаллов.

Проведение измерений показателей преломления и микрофотографирование сокристаллов аминопиридин-нитрофенол (рис. 1) осуществлялось микроскопическим методом, основанным на измерении толщины материала и оптической разности хода лучей в материале с последующим вычислением значения показателя преломления. Измерения проводились на инструментальном микроскопе Olympus STM6.

Более подробно метод измерения показателей преломления описан в работе [19].

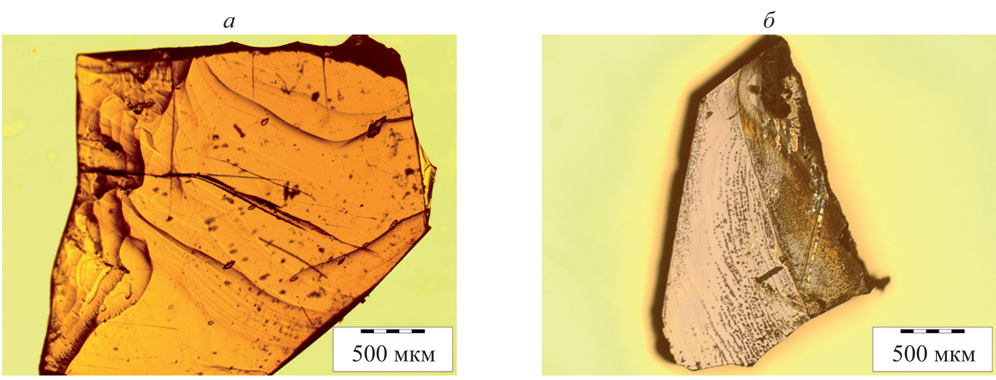


Рис. 1. Микрофотографии сокристаллов аминопиридин-нитрофенол: 4AP4N (*а*); 26DAP4N (*б*)

В ходе выполнения работы выявлено увеличение показателей преломления сокристаллов аминопиридин-нитрофенол в процессе длительного засвечивания. Для выявления изменения анизотропии показателей преломления сокристаллов в процессе фотообесцвечивания, сокристаллы фиксировались в центре предметного столика и пошагово измерялись до полного оборота предметного столика (шаг поворота 30°). Полученные круговые диаграммы показателей преломления органических сокристаллов аминопиридин-нитрофенол в процессе длительного засвечивания представлены на рис. 2. Диапазоны изменения показателей преломления исследуемых сокристаллов для каждого периода засвечивания представлены в таблице.

Как видно из рис. 2, сокристаллам аминопиридин-нитрофенол присуща анизотропия показателей преломления, свойственная соединениям с нецентросимметричной кристаллической структурой, что согласуется с исследованиями, проводимыми в [13, 14]. После засвечивания сокристаллов в течение 7 суток, анизотропия показателей преломления практически перестает наблюдаться, что происходит в результате разрушения водородных связей молекулярного комплекса аминопиридин-нитрофенол [18]. Следует отметить, что целостность сокристаллов при этом не нарушается [17]. Полученные результаты показывают увеличение показателей преломления для обоих исследуемых органических сокристаллов — 2,6-диаминопиридин-4-нитрофенол (26DAP4N) до значения $n = 1{,}976$ и 4-аминопиридин-4-нитрофенол (4AP4N) до значения $n = 2{,}159$ в результате длительного засвечивания.

Выполнено исследование влияния фотоактиничного излучения на показатели преломления органических нелинейно-оптических сокристаллов на базе соединения аминопиридинового ряда (2,6-диаминопи-

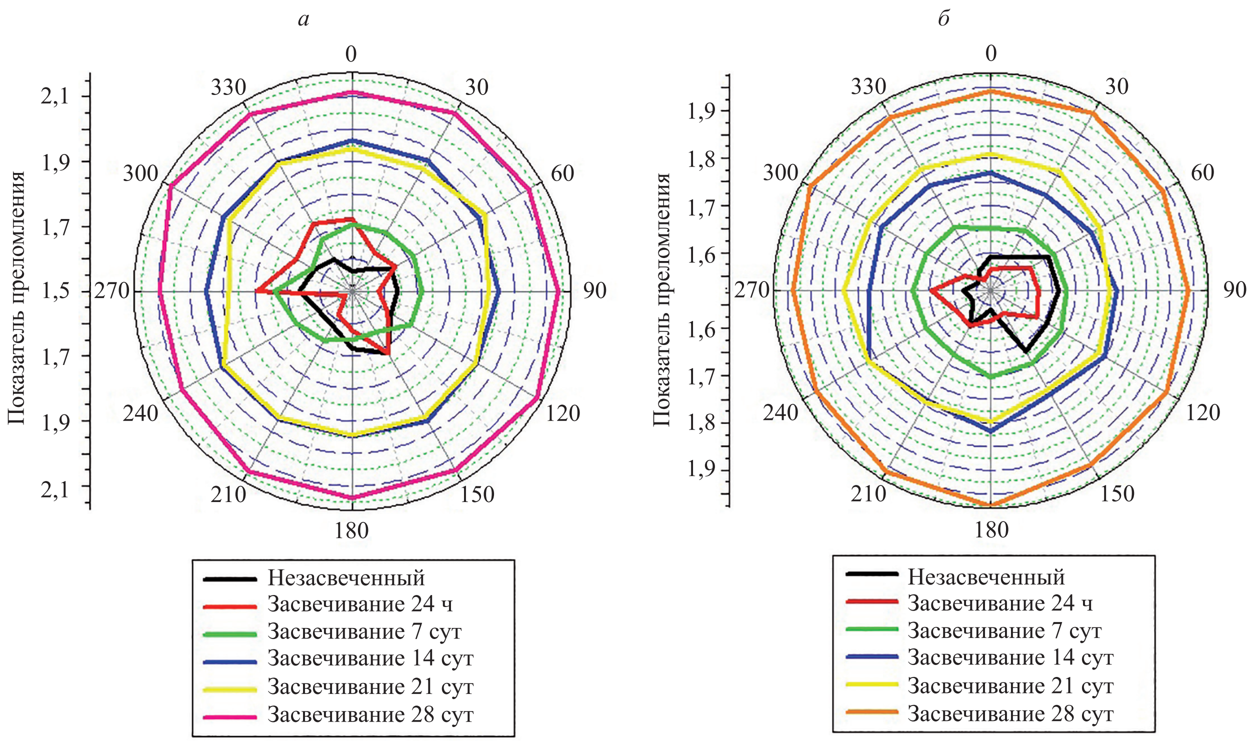


Рис. 2. Круговые диаграммы показателей преломления органических сокристаллов с шагом поворота 30° в процессе длительного засвечивания: 4AP4N (*а*) и 26DAP4N (*б*)

Таблица. Диапазоны изменения значений показателей преломления (n) органических сокристаллов аминопиридин-нитрофенол в процессе длительного засвечивания

Период засвечивания	Диапазоны показателей преломления	
	26DAP4N	4AP4N
Незасвеченный	1,551–1,669	1,561–1,721
Засвечивание 24 ч	1,546–1,645	1,582–1,723
Засвечивание 7 сут	1,652–1,702	1,642–1,739
Засвечивание 14 сут	1,769–1,819	1,937–1,966
Засвечивание 21 сут	1,786–1,831	1,944–1,972
Засвечивание 28 сут	1,938–1,976	2,138–2,159

ридин-4-нитрофенол и 4-аминопиридин-4-нитрофенол) и оптической хромофоры 4-нитрофенол, в ходе которого, выявлено увеличение показателей преломления обоих сокристаллов аминопиридин-нитрофенол в процессе длительного засвечивания наряду с исчезновением анизотропии. Метод фотообесцвечивания позволяет создавать локальное изменение показателей преломления, что, в свою очередь, позволит создавать на базе исследуемых сокристаллов аминопиридин-нитрофенол структуры, с заданным распределением оптических свойств.

Проведенные исследования показывают актуальность и эффективность применения фотообесцвечивания как метода для создания периодических структур с локально заданным распределением оптических свойств (периодические решетки, фотонно-кристаллические структуры и т. д.) на базе сокристаллов аминопиридинового ряда.

Литература

1. Dalton L.R., Sullivan P.A., Bale D.H., Olbricht B.C. Theory-inspired nano-engineering of photonic and electronic materials: Noncentrosymmetric charge-transfer electro-optic materials // Solid-State Electronics. 2007. V. 51. N 10. P. 1263–1277. doi: 10.1016/j.sse.2007.06.022
2. Lee S.-H., Jazbinsek M., Hauri C.P., Kwon O.-P. Recent progress in acentric core structures for highly efficient nonlinear optical crystals and their supramolecular interactions and terahertz applications // CrystEngComm. 2016. V. 18. N 38. P. 7180–7203. doi: 10.1039/c6ce00707d
3. Okwieka U., Szostak M.M., Misiaszek T., Turowska-Tyrk I., Natkaniec I., Pavlukojć A. Spectroscopic, structural and theoretical studies of 2-methyl-4-nitroaniline (MNA) crystal. Electronic transitions in IR // Journal of Raman Spectroscopy. 2008. V. 39. N 7. P. 849–862. doi: 10.1002/jrs.1924
4. Guillaume M., Botek E., Champagne B., Castet F., Ducasse L. Theoretical investigation of the linear and second-order nonlinear susceptibilities of the 3-methyl-4-nitropyridine-1-oxyde (POM) crystal // Journal of Chemical Physics. 2004. V. 121. N 15. P. 7390–7400. doi: 10.1063/1.1790952
5. Banfi G.P., Degiorgio V., Sherwood J.N. Frequency conversion processes in the non-linear organic crystal N-(4-nitrophenyl)-l-prolinol // Synthetic Metals. 2001. V. 124. N 1. P. 221–225. doi: 10.1016/S0379-6779(01)00458-1
6. Yang Z., Mutter L., Stillhart M., Ruiz B., Aravazhi S., Jazbinsek M., Schneider A., Gramlich V., Günter P. Large-size bulk and thin-film stilbazolium-salt single crystals for nonlinear optics and THz generation // Advanced Functional Materials. 2007. V. 17. N 13. P. 2018–2023. doi: 10.1002/adfm.200601117
7. Mutter L., Jazbinšek M., Zgonik M., Meier U., Bosshard C., Günter P. Photobleaching and optical properties of organic crystal 4-N, N-dimethylamino-4′-N′-methyl stilbazolium tosylate // Journal of Applied Physics. 2003. V. 94. N 3. P. 1356–1361. doi: 10.1063/1.1588359
8. Cai B., Komatsu K., Kaino T. Refractive index control and waveguide fabrication of DAST crystals by photobleaching technique // Optical Materials. 2003. V. 21. N 1-3. P. 525–529. doi: 10.1016/S0925-3467(02)00194-5
9. Cai B., Hattori T., Deng H.H., Komatsu K., Zawadzki C., Keil N., Kaino T. Refractive index control and grating fabrication of 4′-N, N-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate crystal // Japanese Journal of Applied Physics. 2001. V. 40. N 9A/B. P. L964–L966. doi: 10.1143/JJAP.40.L964
10. Cai B., Radmer O., Zawadzki C., Yao H.H., Keil N., Kaino T. DAST crystal waveguide fabrication by photobleaching method // Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials. 2004. V. 13. N 2. P. 195–208. doi: 10.1142/S0218863504001918
11. Kaino T., Cai B., Takayama K. Fabrication of DAST channel optical waveguides // Advanced Functional Materials. 2002. V. 12. N 9. P. 599–603. doi: 10.1002/1616-3028(20020916)12:9<599::AID-ADFM599>3.0.CO;2-H
12. Cai B., Ushiwata T., Komatsu K., Kaino T. Fabrication of serially grafted 4-(4-dimethyl-aminostyryl)-1-methylpyridinium tosylate crystal waveguide by photobleaching // Japanese Journal of Applied Physics. 2004. V. 43. N 3B. P. L390–L392. doi: 10.1143/JJAP.43.L390
13. Pavlovetc I.M., Draguta S., Fokina M.I., Timofeeva T.V., Denisyuk I.Yu. Synthesis, crystal growth, thermal and spectroscopic studies of acentric materials constructed from aminopyridines and 4-nitrophenol // Optics Communications. 2016. V. 362. P. 64–68. doi: 10.1016/j.optcom.2015.05.034

References

1. Dalton L.R., Sullivan P.A., Bale D.H., Olbricht B.C. Theory-inspired nano-engineering of photonic and electronic materials: Noncentrosymmetric charge-transfer electro-optic materials. *Solid-State Electronics*, 2007, vol. 51, no. 10, pp. 1263–1277. doi: 10.1016/j.sse.2007.06.022
2. Lee S.-H., Jazbinsek M., Hauri C.P., Kwon O.-P. Recent progress in acentric core structures for highly efficient nonlinear optical crystals and their supramolecular interactions and terahertz applications. *CrystEngComm*, 2016, vol. 18, no. 38, pp. 7180–7203. doi: 10.1039/c6ce00707d
3. Okwieka U., Szostak M.M., Misiaszek T., Turowska-Tyrk I., Natkaniec I., Pavlukojć A. Spectroscopic, structural and theoretical studies of 2-methyl-4-nitroaniline (MNA) crystal. *Electronic transitions in IR. Journal of Raman Spectroscopy*, 2008, vol. 39, no. 7, pp. 849–862. doi: 10.1002/jrs.1924
4. Guillaume M., Botek E., Champagne B., Castet F., Ducasse L. Theoretical investigation of the linear and second-order nonlinear susceptibilities of the 3-methyl-4-nitropyridine-1-oxyde (POM) crystal. *Journal of Chemical Physics*, 2004, vol. 121, no. 15, pp. 7390–7400. doi: 10.1063/1.1790952
5. Banfi G.P., Degiorgio V., Sherwood J.N. Frequency conversion processes in the non-linear organic crystal N-(4-nitrophenyl)-l-prolinol. *Synthetic Metals*, 2001, vol. 124, no. 1, pp. 221–225. doi: 10.1016/S0379-6779(01)00458-1
6. Yang Z., Mutter L., Stillhart M., Ruiz B., Aravazhi S., Jazbinsek M., Schneider A., Gramlich V., Günter P. Large-size bulk and thin-film stilbazolium-salt single crystals for nonlinear optics and THz generation. *Advanced Functional Materials*, 2007, vol. 17, no. 13, pp. 2018–2023. doi: 10.1002/adfm.200601117
7. Mutter L., Jazbinšek M., Zgonik M., Meier U., Bosshard C., Günter P. Photobleaching and optical properties of organic crystal 4-N, N-dimethylamino-4′-N′-methyl stilbazolium tosylate. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 94, no. 3, pp. 1356–1361. doi: 10.1063/1.1588359
8. Cai B., Komatsu K., Kaino T. Refractive index control and waveguide fabrication of DAST crystals by photobleaching technique. *Optical Materials*, 2003, vol. 21, no. 1-3, pp. 525–529. doi: 10.1016/S0925-3467(02)00194-5
9. Cai B., Hattori T., Deng H.H., Komatsu K., Zawadzki C., Keil N., Kaino T. Refractive index control and grating fabrication of 4′-N, N-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate crystal. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 40, no. 9A/B, pp. L964–L966. doi: 10.1143/JJAP.40.L964
10. Cai B., Radmer O., Zawadzki C., Yao H.H., Keil N., Kaino T. DAST crystal waveguide fabrication by photobleaching method. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2004, vol. 13, no. 2, pp. 195–208. doi: 10.1142/S0218863504001918
11. Kaino T., Cai B., Takayama K. Fabrication of DAST channel optical waveguides. *Advanced Functional Materials*, 2002, vol. 12, no. 9, pp. 599–603. doi: 10.1002/1616-3028(20020916)12:9<599::AID-ADFM599>3.0.CO;2-H
12. Cai B., Ushiwata T., Komatsu K., Kaino T. Fabrication of serially grafted 4-(4-dimethyl-aminostyryl)-1-methylpyridinium tosylate crystal waveguide by photobleaching. Japanese *Journal of Applied Physics*, 2004, vol. 43, no. 3B, pp. L390–L392. doi: 10.1143/JJAP.43.L390
13. Pavlovetc I.M., Draguta S., Fokina M.I., Timofeeva T.V., Denisyuk I.Yu. Synthesis, crystal growth, thermal and spectroscopic studies of acentric materials constructed from aminopyridines and 4-nitrophenol. *Optics Communications*, 2016, vol. 362, pp. 64–68. doi: 10.1016/j.optcom.2015.05.034

14. Draguta S., Fonari M.S., Masunov A.E., Zazueta J., Sullivan S., Antipin M.Yu., Timofeeva T.V. New acentric materials constructed from aminopyridines and 4-nitrophenol // CrystEngComm. 2013. V. 15. N 23. P. 4700–4710. doi: 10.1039/c3ce40291f
15. Esaulkov M.N., Fokina M.I., Zulina N.A., Timofeeva T.V., Shkurinov A.P., Denisyuk I.Yu. Aminopyridines and 4-nitrophenol cocrystals for terahertz application // Optics and Laser Technology. 2018. V. 108. P. 450–455. doi: 10.1016/j.optlastec.2018.07.033
16. Tu C.-M., Chou L.-H., Chen Y.-C., Huang P., Rajaboopathi M., Luo C.-W., Wu K.-H., Krishnakumar V., Kobayashi T. THz emission from organic cocrystalline salt: 2,6-diaminopyridinium-4-nitrophenolate-4-nitrophenol // Optics Express. 2016. V. 24. N 5. P. 5039–5044. doi: 10.1364/OE.24.005039
17. Zhevaikin K.E., Fokina M.I., Sitnikova V.E., Sinko A.S., Ozheredov I.A., Ledoux-Rak I., Denisyuk I.Yu. Photobleaching of nonlinear organic co-crystals 2,6-diaminopyridine-4-nitrophenol-4-nitrophenolate // Laser Physics Letters. 2020. V. 17. N 3. P. 035401. doi: 10.1088/1612-202X/ab6fff
18. Zhevaikin K.E., Denisyuk I.Yu., Fokina M.I., Sitnikova V.E. Influence of processes of photobleaching on spectral characteristics of organic nonlinear optical co-crystal 26DAP4N // PHOTOPTICS 2019: Proc. of the 7th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology. 2019. P. 220–224. doi: 10.5220/0007404102200224
19. Zhevaikin K.E., Fokina M.I., Denisyuk I.Y. Refractometric parameters of nonlinear optical molecular cocrystals based on the aminopyridine series // Optics and Spectroscopy. 2018. V. 124. N 2. P. 227–229. doi: 10.1134/S0030400X18020212

14. Draguta S., Fonari M.S., Masunov A.E., Zazueta J., Sullivan S., Antipin M.Yu., Timofeeva T.V. New acentric materials constructed from aminopyridines and 4-nitrophenol. *CrystEngComm*, 2013, vol. 15, no. 23, pp. 4700–4710. doi: 10.1039/c3ce40291f
15. Esaulkov M.N., Fokina M.I., Zulina N.A., Timofeeva T.V., Shkurinov A.P., Denisyuk I.Yu. Aminopyridines and 4-nitrophenol cocrystals for terahertz application. *Optics and Laser Technology*, 2018, vol. 108, pp. 450–455. doi: 10.1016/j.optlastec.2018.07.033
16. Tu C.-M., Chou L.-H., Chen Y.-C., Huang P., Rajaboopathi M., Luo C.-W., Wu K.-H., Krishnakumar V., Kobayashi T. THz emission from organic cocrystalline salt: 2,6-diaminopyridinium-4-nitrophenolate-4-nitrophenol. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 5, pp. 5039–5044. doi: 10.1364/OE.24.005039
17. Zhevaikin K.E., Fokina M.I., Sitnikova V.E., Sinko A.S., Ozheredov I.A., Ledoux-Rak I., Denisyuk I.Yu. Photobleaching of nonlinear organic co-crystals 2,6-diaminopyridine-4-nitrophenol-4-nitrophenolate. *Laser Physics Letters*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 035401. doi: 10.1088/1612-202X/ab6fff
18. Zhevaikin K.E., Denisyuk I.Yu., Fokina M.I., Sitnikova V.E. Influence of processes of photobleaching on spectral characteristics of organic nonlinear optical co-crystal 26DAP4N. *PHOTOPTICS 2019: Proc. of the 7th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology*, 2019, pp. 220–224. doi: 10.5220/0007404102200224
19. Zhevaikin K.E., Fokina M.I., Denisyuk I.Y. Refractometric parameters of nonlinear optical molecular cocrystals based on the aminopyridine series. *Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 124, no. 2, pp. 227–229. doi: 10.1134/S0030400X18020212

Авторы

Жевайкин Кирилл Евгеньевич — аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57201440929, ORCID ID: 0000-0003-2576-2928, kiraje92@yandex.ru

Фокина Мария Ивановна — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, заместитель декана факультета, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 22937746800, ORCID ID: 0000-0002-7927-2732, mari2506@rambler.ru

Широкова Алина Станиславовна — студент, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-6370-859X, shirokova.a.s@mail.ru

Authors

Kirill E. Zhevaikin — Postgraduate, Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57201440929, ORCID ID: 0000-0003-2576-2928, kiraje92@yandex.ru

Maria I. Fokina — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Deputy Dean, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 22937746800, ORCID ID: 0000-0002-7927-2732, mari2506@rambler.ru

Alina S. Shirokova — Student, Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-6370-859X, shirokova.a.s@mail.ru